

Die globale Erwärmung verstehen – Treibhauseffekt und Klimawandel

Woher kommt die weltweite Temperaturerhöhung?

Unbestritten ist, dass der Erwärmungstrend über die letzten 50 Jahre in Höhe von $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt fast zweimal so groß ist wie derjenige über die letzten 100 Jahre. 2015 erreichte die Temperaturerhöhung weltweit den Wert von $0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem vorindustriellen Niveau.

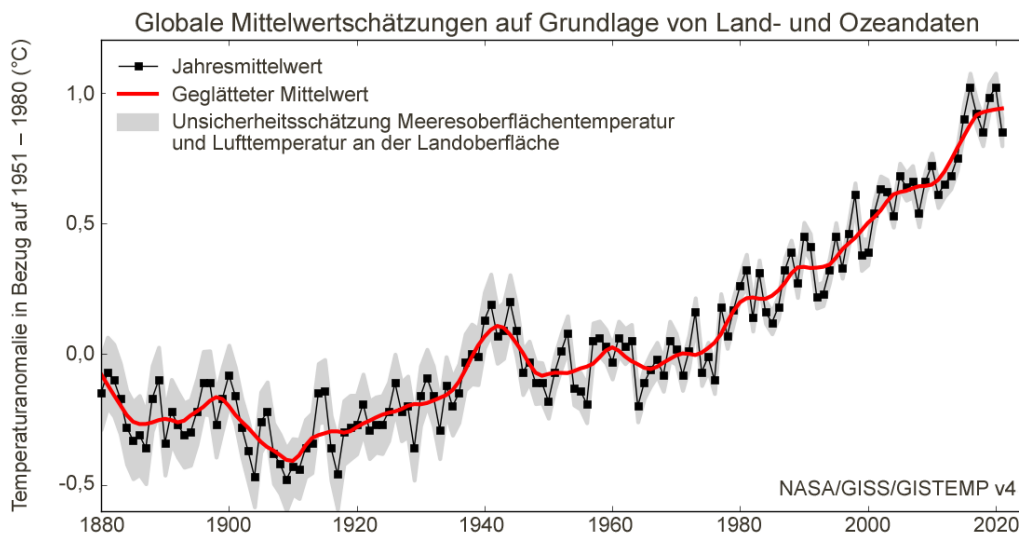


Abb. 1: Weltweiter Land-Ozean-Temperaturindex.

Von: NASA Goddard Institute for Space Studies, Lizenz: CC 0; Übersetzung: Siemens Stiftung

Kritiker der These vom anthropogenen (menschengemachten) Klimawandel sagen, es habe in der Geschichte des Klimas der Erde schon immer sehr starke Temperaturschwankungen gegeben. Diese hätte es auch gegeben, lange bevor der Mensch überhaupt Einfluss auf das Klima nehmen konnte, beispielsweise durch Schwankungen der Sonnenaktivität. Doch inzwischen weiß man über den Klimaverlauf der letzten 50.000 Jahre auf der Erde genau Bescheid.

Aufgrund der Untersuchung von Sedimenten, Baumwuchsringen und Eisbohrkernen kann man den Temperaturverlauf der ca. letzten 50.000 Jahre auf ein Jahr genau zurückverfolgen. Dabei zeigt sich zwar, dass es auch ohne Zutun des Menschen eine Vielzahl von starken Temperaturänderungen gab. Allerdings ereigneten sich diese Temperaturänderungen alle relativ sprunghaft innerhalb weniger Jahre.

Im Unterschied dazu erfolgte über die letzten 150 Jahre eine bislang nicht dagewesene kontinuierliche Erwärmung. Diese erfolgte parallel zur Industrialisierung und der Zunahme und Intensivierung der Landwirtschaft und der damit verbundenen vermehrten Produktion von Treibhausgasen (zum Beispiel CO_2 , CH_4 , N_2O und andere), wie ein Vergleich der Abbildungen 1 und 2 zeigt. Daher lässt die bestehende Datenlage keine Zweifel an einer menschengemachten Klimaänderung.

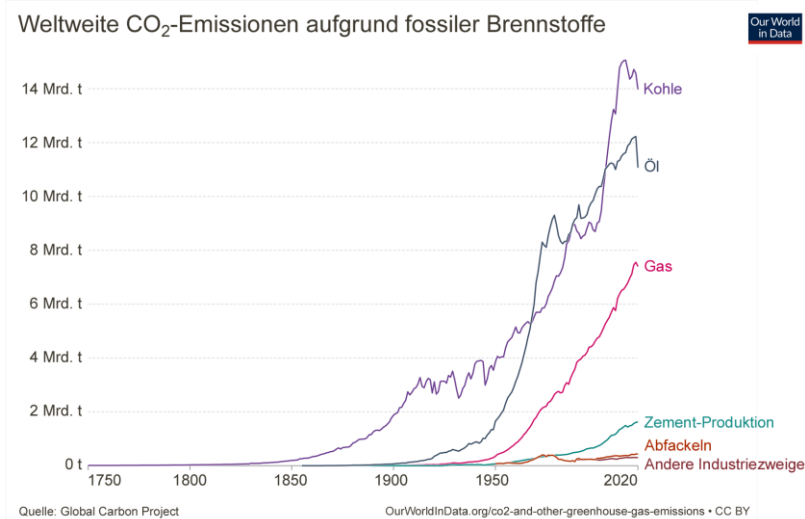


Abb. 2: Weltweite CO₂-Emissionen aufgrund fossiler Brennstoffe 1750–2020.

Grafik von: Our World in Data; <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>; Lizenz: CC BY; Übersetzung: Siemens Stiftung

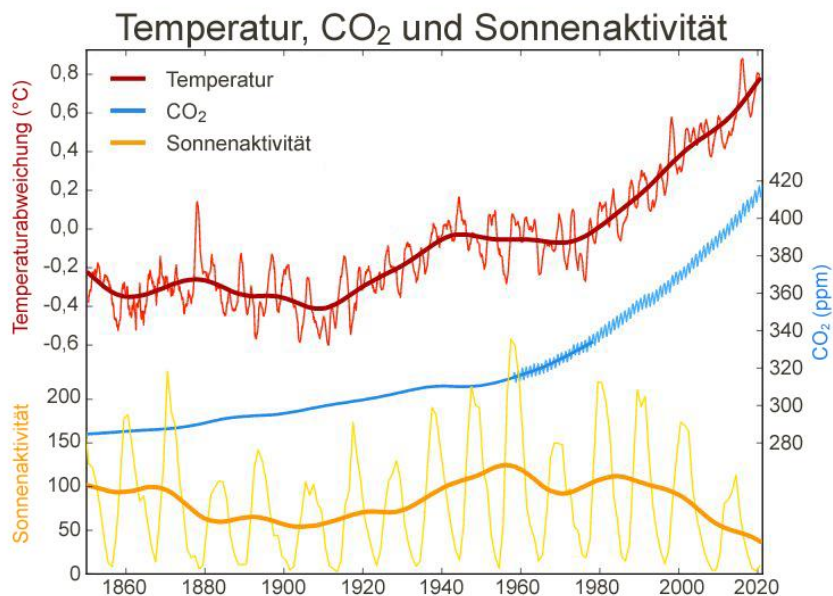


Abb. 3: Durchschnittstemperatur, CO₂ in der Atmosphäre und Sonnenaktivität seit 1850. Die dicken Linien für Temperatur und Sonnenaktivität zeigen eine Glättung der Rohdaten (Durchschnitt von jeweils 25 Jahren).

Von Leland McInnes aus der englischsprachigen Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6696694>; Übersetzung: Siemens Stiftung

Auch die Behauptung, dass der Klimawandel durch Schwankungen der Sonnenaktivität zustande kommt, lässt sich – wie in Abbildung 3 gezeigt – nicht halten.

Was versteht man unter der Trägheit des Klimas?

Wäre es möglich, all unsere Treibhausgas-Emissionen auf einen Schlag zu stoppen, würde sich die Temperatur auf der Erde zwar stabilisieren, aber nicht zurückgehen, da der natürliche Abbauprozess in der Atmosphäre Jahrhunderte bis Jahrtausende dauert.

Auch der Anstieg des Meeresspiegels würde weiter voranschreiten, da sich die Ozeane langsamer erwärmt haben als der Rest der Erde und sich das Wasser somit weiter ausdehnt, bis sich die Temperaturen angeglichen haben.

Das heißt, dass es nur durch das aktive Entfernen von CO₂ aus der Atmosphäre (zum Beispiel durch Aufforstung oder durch Filtern von CO₂ aus der Luft) möglich ist, die globale Temperatur auf das vorindustrielle Niveau zu senken.

Welche Bedeutung hat das sogenannte 1,5-Grad-Ziel?

Auf der Pariser Klimakonferenz 2015 haben sich 195 Länder in einem Klima-Abkommen dazu verpflichtet, die globale Erwärmung möglichst auf 1,5 °C beziehungsweise auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen. Eine Begrenzung auf 1,5 °C ist zwar aktuell noch möglich, erfordert aber zügiges und entschlossenes Handeln.

Das 1,5-Grad-Ziel kann nur noch eingehalten werden, wenn in den nächsten Jahrzehnten anhaltende große Anstrengungen zur drastischen Reduktion der Treibhausgasemissionen auf der ganzen Welt und in allen Wirtschaftszweigen unternommen werden.

Wodurch wird, abweichend vom globalen Klima, das lokale Klima beeinflusst?

Aufgrund der lokalen Temperaturunterschiede auf der Erde existieren ständige Luft- und Meeresströmungen zwischen wärmeren und kälteren Gebieten. So ist z. B. das Klima in Mitteleuropa durch den warmen Golfstrom derzeit wärmer, als es der geografischen Lage entspricht. Es könnte aber, wenn sich der Golfstrom durch die Erwärmung Europas verlangsamt, in Europa sogar kälter werden. Der sog. Golfstrom ist thermohalin, d. h. er wird durch Unterschiede in der Temperatur und im Salzgehalt in Gang gehalten.

Früher war das Wetter in Deutschland vor allem durch West- und Ostluftströmungen bestimmt. Dass seit einigen Jahren das Wetter in Deutschland im Unterschied zu früher zunehmend durch Nord- und Südströmungen bestimmt ist, wird oft mit Änderungen der Meereswassertemperaturen im Polarmeer begründet.

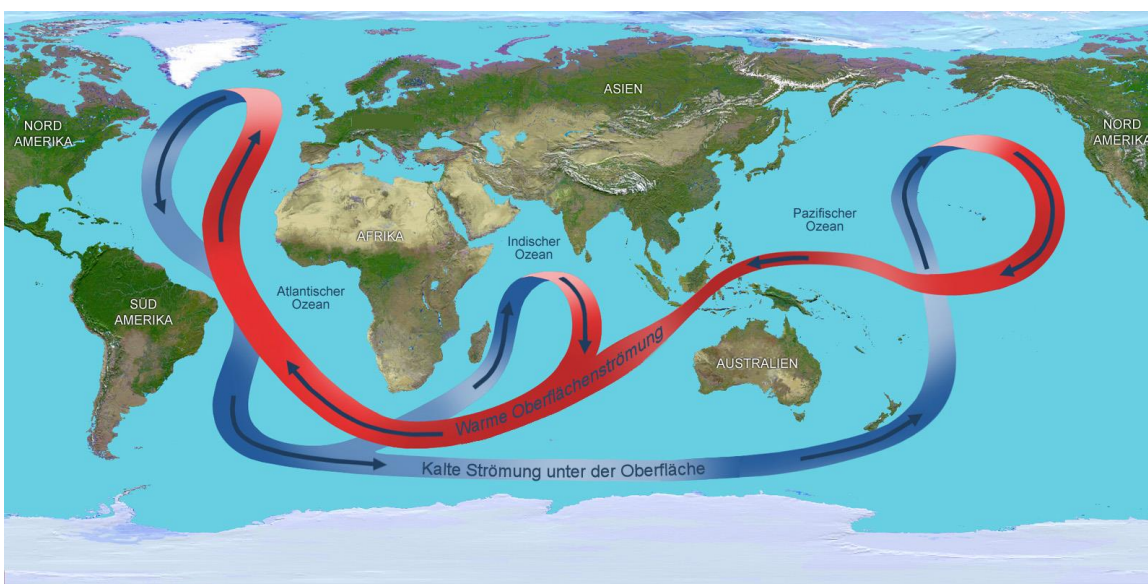


Abb. 4: Das „thermohaline globale Förderband“.

Von NASA - NASA, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84677622>; Übersetzung: Siemens Stiftung

Wachsende Gletscher – Widerspricht das nicht dem Klimawandel?

In den Alpen, in Südamerika und im Himalaja schmelzen die Gletscher ab, aber in Neuseeland wachsen sie. Dies ist jedoch kein Widerspruch zur globalen Klimaerwärmung. Denn aufgrund der erhöhten Meerestemperaturen um Neuseeland steigt die Wasserdampfbildung und damit die Wolkenbildung. Diese Wolken werden aufgrund der Luftströmungen weit transportiert. Deshalb schneit es auf den hohen Bergen (über 3.000 m) Neuseelands, das von erwärmtem Meer umgeben ist, mehr als früher und die Gletscher dort wachsen.

Dagegen schmelzen in Grönland die Gletscher und die Eisdecke der Arktis wird dünner und kleiner. Die Eisdecke am Rand der Antarktis schmilzt derzeit, aber im Inneren der Antarktis wächst sie durch verstärkten Schneefall.

Der Treibhauseffekt und seine Ursachen

Der Treibhauseffekt soll Ursache des weltweiten Klimawandels sein. Doch was genau ist dieser Treibhauseffekt? Fälschlicherweise wird der Treibhauseffekt als etwas prinzipiell Negatives dargestellt. Zunächst muss deshalb richtiggestellt werden, dass ohne den natürlichen Treibhauseffekt kein Leben auf der Erde möglich wäre. Denn ohne Treibhauseffekt, d. h. ohne Atmosphäre, würde die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche bei nur $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ anstatt bei $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen. Wir unterscheiden also den natürlichen Treibhauseffekt und den vom Menschen zusätzlich verursachten, anthropogen verstärkten Treibhauseffekt.

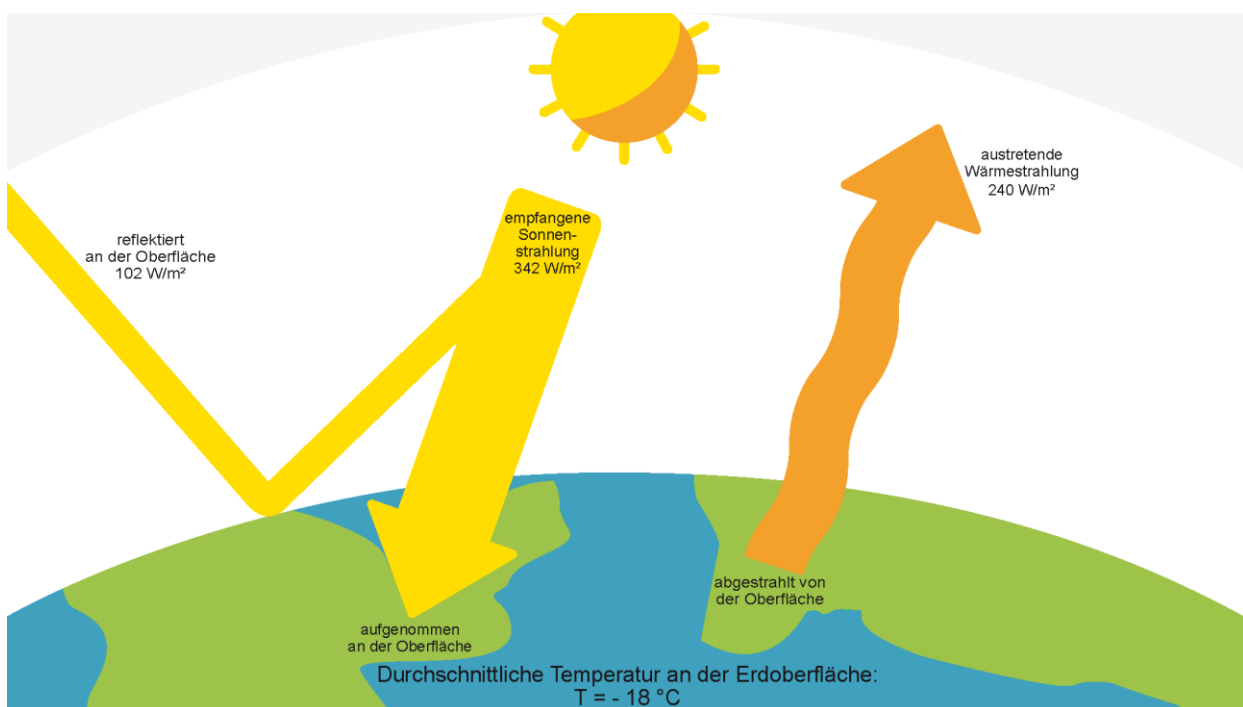


Abb. 5: Ohne Treibhauseffekt wäre die Erdoberfläche $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ kalt.

Wir stellen uns die Erde zunächst ohne Hülle aus Gasen, Wolken und Staub vor. Die Erde ist also eine vom Sonnenlicht angestrahlte, „nackte“ Kugel, die sich so lange aufheizen würde, bis eine bestimmte Temperatur erreicht ist. Dass diese Temperatur nicht stetig weiter ansteigt, beruht auf dem sog. „Strahlungsgleichgewicht“: Ab dem Erreichen einer bestimmten Temperatur strahlt die Erdkugel genauso viel Energie pro Zeiteinheit wieder ab, wie sie aufnimmt; die Abstrahlungsleistung ist dann gleich der Einstrahlungsleistung. Wir sehen in der Grafik, dass die Summe aus der

an der Erdoberfläche direkt reflektierten Strahlung (102 W/m^2) und der von der erwärmten Erdoberfläche wieder abgestrahlten Leistung (240 W/m^2) genauso groß ist wie die eingestrahlte Sonnenleistung (342 W/m^2).

Woher kommt es, dass die Erdoberfläche 15°C warm ist?

Wie oben erwähnt, müssen nach dem Gesetz des Strahlungsgleichgewichts 100 % der von der Sonne eingestrahnten Energie auch wieder von der Erde abgestrahlt werden. Warum kommt es dennoch zu einer Erhöhung der Erdtemperatur?

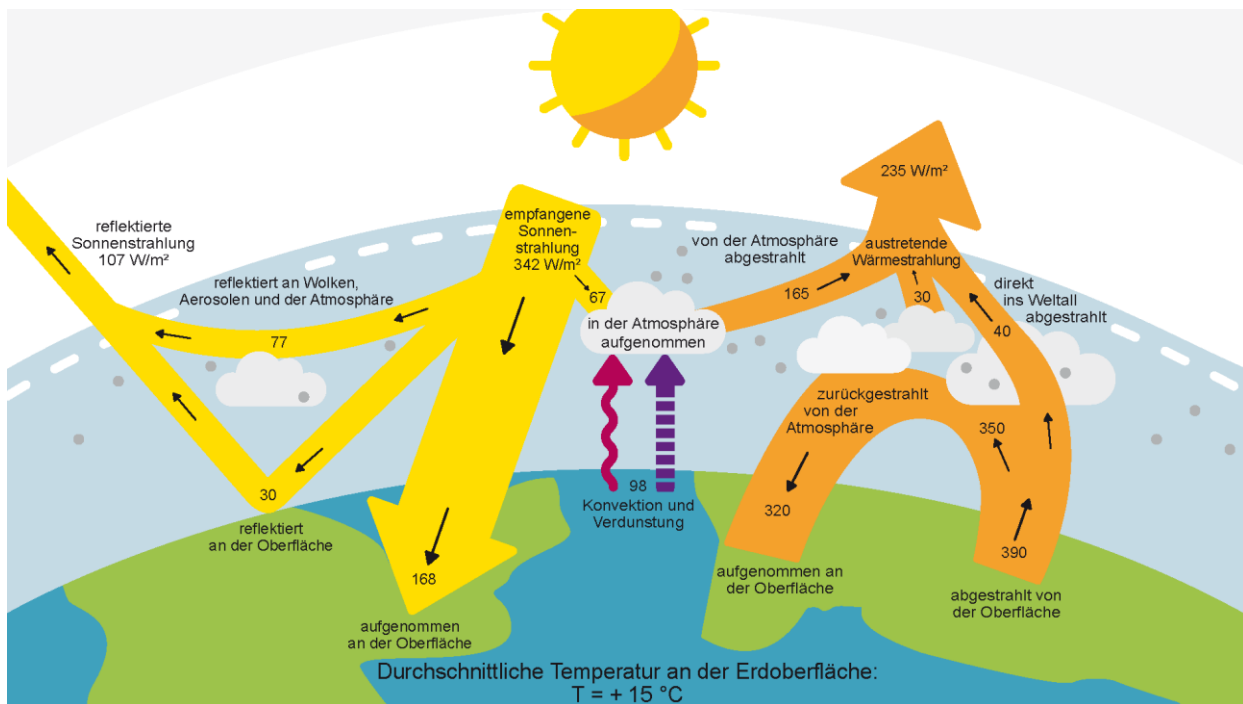


Abb. 6: Globale Strahlungsbilanz der Erde.

Etwas vereinfacht lässt sich das folgendermaßen erklären:

Sonneneinstrahlung

- Wegen der hohen Temperatur der Sonnenoberfläche von ca. 6.000°C ist das auf die Erde fallende Sonnenlicht relativ kurzwellig (Schwerpunkt UV bis nahes IR).
- Trifft das Sonnenlicht auf die Erdatmosphäre, werden ca. 22 % direkt zurück in den Weltraum reflektiert. Der Hauptteil des Lichts (70 %) dringt durch die Atmosphäre hindurch, denn in ihr findet praktisch keine Absorption dieser kurzen Wellenlängen statt (CO_2 , CH_4 , N_2O und andere Gase absorbieren keine kurzen Wellenlängen). Nur bestimmte Aerosole, Ozon sowie Ruß- und Ascheteilchen absorbieren auch in diesem kurzwelligen Bereich (knapp 20 %).
- An der Erdoberfläche werden ca. 9 % reflektiert und gelangen von dort zurück in den Weltraum. Die restlichen 50 % werden durch Umwandlung der Strahlungsenergie des Lichts in Wärmeenergie (= Bewegung der kleinsten Teilchen der Materie) absorbiert.

Konvektion und Verdunstung

- Durch aufsteigende erwärmte Luftschichten (Konvektion) und verdampfendes Wasser (Verdunstung) werden ca. 58 % der in der Erdoberfläche gespeicherten Wärmeenergie zurück in die Atmosphäre transportiert.
- Diese erwärmten Luft- und Wolkenschichten strahlen selbst wieder langwellig ab, einen relativ großen Teil davon in Richtung Erdoberfläche (Rückstrahlung).

Wiederabstrahlung der Erdoberfläche

- 42 % der gespeicherten Wärmeenergie strahlt die Erdoberfläche direkt wieder ab. Verglichen mit der Sonne ist die Temperatur der Erdoberfläche jedoch sehr niedrig, deshalb ist die Erdbstrahlung extrem langwellig (fernes IR).
- Ein guter Teil dieser langwelligen Abstrahlung wird von vielen Gasen der Atmosphäre absorbiert (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O usw.).

Rückstrahlung der Atmosphäre

- Die erwärmten* Gasmoleküle strahlen nun selbst wieder ab, einen guten Teil davon zurück in Richtung Erdoberfläche (= „Rückstrahlung“).
- * Die Wärme ist als Bewegungsenergie wie Vibration und Rotation gespeichert.

Erhöhung der Erdtemperatur durch Ausbildung oberflächennaher warmer Schichten

- Folge: Die Erdoberfläche bleibt durch Ausbildung von aufgewärmten Schichten über der Erdoberfläche warm. Und das obwohl (wegen Energieerhaltung und Strahlungsgleichgewicht) außer der für Photosynthese verbrauchten Energie über 99,99 % wieder ins Weltall abgestrahlt werden.

Reflexion erklärt nicht den Treibhauseffekt!

Oft liest man falsche Erklärungen, die den Treibhauseffekt aufgrund von Reflexion erklären. Doch wie wir gesehen haben, beruht der Treibhauseffekt im Wesentlichen auf der Absorption der von der Erde abgestrahlten langwelligen Strahlung durch die Treibhausgasmoleküle. Die Wiederabstrahlung (ist nicht gleich Reflexion!) dieser Moleküle bewirkt zusammen mit den durch Konvektion und Verdunstung transportierten warmen Molekülen eine Rückstrahlung auf die Erde und die Ausbildung erdnahe aufgewärmter Schichten.

Die Atmosphäre reflektiert also nicht die von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung, sondern sie absorbiert diese und strahlt sie zurück.

Reflexion (von lateinisch reflectere = zurückbiegen) bezeichnet in der Physik der elektromagnetischen Wellen das Zurückwerfen/Reflektieren von Wellen an einer Grenzfläche. Im Gegensatz dazu findet bei der Absorption eine Umwandlung der Energieform statt. Strahlt ein durch Absorption erwärmter Körper wieder Strahlungsenergie ab, spricht man von Wiederabstrahlung und nicht von Reflexion.

Der menschengemachte Treibhauseffekt

Erhöhung der Erdtemperatur durch Zunahme der Treibhausgase

Treibhausgase produzieren also keine Energie. Sie helfen vielmehr, ein Gleichgewicht auf einem Niveau zu erzeugen, bei dem die bodennahe Schicht der Atmosphäre – in der wir leben – „lebensfreundlich“ warm ist. Nimmt nun durch menschliche Aktivitäten die Konzentration von

Treibhausgasen in der Atmosphäre zu, steigt die Absorption und damit die Rückstrahlung, was wiederum zu einer Erhöhung der Temperatur in den erdnahen Schichten führt.

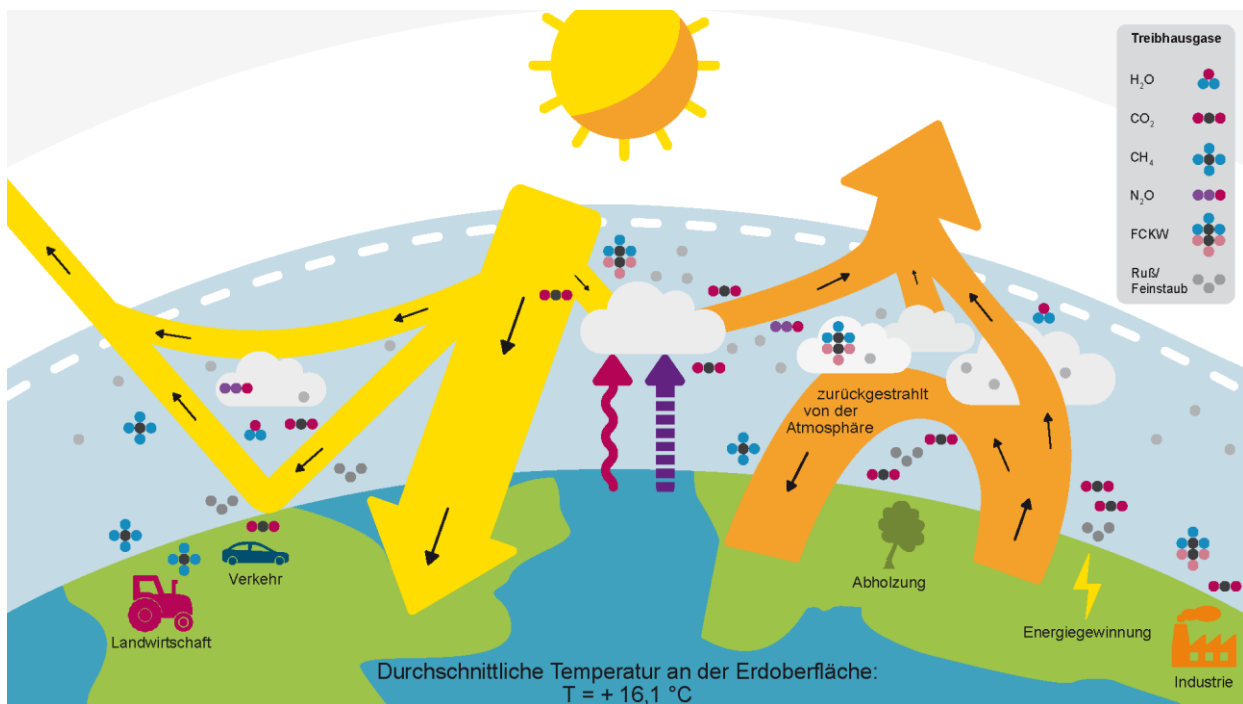


Abb. 7: Anstieg der Erdtemperatur durch menschengemachte Treibhausgase.

Welche Gase tragen zum Treibhauseffekt bei?

Die natürlich vorkommenden Gase wie Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) absorbieren die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche und verstärken die Gegenstrahlung, die zurück zur Erde geworfen wird. Das Emissions- und Absorptionsvermögen hängt vor allem bei Gasen sehr stark von der Wellenlänge ab. Das ist insbesondere bei den drei wichtigen Treibhausgasen Wasserdampf, CO₂ und CH₄ der Fall. Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂) sind die beiden Hauptgase, die ca. 99 % der Atmosphäre bilden. Sie besitzen im erdenergetisch wichtigen Bereich der langwelligen Wärmestrahlung kein Emissions- und Absorptionsvermögen.

Mengenmäßig trägt Wasserdampf von Natur aus den weitaus größten Teil (ca. zwei Drittel) zum Treibhauseffekt bei. Es folgen CO₂ mit einem Anteil von ca. 15 %, O₃ mit etwa 10 % und schließlich Distickstoffoxid (N₂O) und CH₄ mit je etwa 3 %. Zur genauen Berechnung der Anteile muss außerdem auch der Einfluss der Bewölkung und der Schwebeteilchen wie Staub und Aerosole auf die Sonnen- und Wärmestrahlung bekannt sein.

Die bei einem starken Vulkanausbruch freigesetzten Ascheteilchen und die SO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch die Abschirmung der Erdoberfläche vom Sonnenlicht können beispielsweise eine mehrere Jahre andauernde Absenkung der Erdtemperatur bewirken. Das war erdgeschichtlich schon häufiger der Fall.

Die Physik des Treibhauseffekts im Detail

Die ankommende Strahlungsleistung

Aus dem weiter oben erklärten Strahlungsgleichgewicht ergibt sich die Temperatur der Erdoberfläche, die sich wiederum mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnen lässt:

$$S_E = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S_E}{\sigma}}$$

Dabei ist S_E die Strahlungsdichte in W/m^2 . Die Dichte der Sonnenstrahlung beträgt auf der Umlaufbahn der Erde um die Sonne 1.370 W/m^2 . Da diese Raumstrahlung nicht auf die Kugeloberfläche ($4 \cdot \pi \cdot r^2$) der Erde einwirkt, sondern auf den Querschnitt ($\pi \cdot r^2$), errechnet sich die empfangene Strahlungsdichte, bezogen auf die Kugeloberfläche der Erde folgendermaßen:

$$1.370 \cdot (\pi \cdot r^2) / (4 \cdot \pi \cdot r^2) = 342 \text{ W/m}^2.$$

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich für eine Erde ohne Atmosphäre eine Oberflächentemperatur von -18°C . Ohne einen weiteren wärmenden Effekt wäre die Erde mit einer Temperatur von -18°C für den Menschen nicht bewohnbar.

Die Physik der Treibhausgase

Die Stärke der Bindungskräfte zwischen den Atomen und deren Änderung während der Schwingung bestimmen in Molekülen den Wellenlängenbereich, in dem Energie absorbiert wird. Die langwellige thermische Strahlung können nur solche Moleküle absorbieren, die aus mehreren Atomsorten bestehen und beim Schwingen ihr Dipolmoment ändern. Zweiatomige unpolare Gase wie O_2 und N_2 können nur symmetrische Schwingungen ohne Änderung des Dipolmoments ausführen. Das dreiatomige Kohlendioxid führt neben symmetrischen auch unsymmetrische Schwingungen aus. Diese werden durch Wärmestrahlung im Bereich von $4,3 \mu\text{m}$ bis $15,3 \mu\text{m}$ angeregt – ein Bereich, der sich gut mit dem Strahlungsspektrum der erwärmten Erdoberfläche deckt, das von ca. $3 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$ reicht. Vor diesem Hintergrund ist der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Das Medienpaket „Experimento | 10+: B2 Treibhauseffekt im Trinkbecher“, das auf dem Medienportal der Siemens Stiftung vorhanden ist, enthält eine Experimentieranleitung zu einem Experiment, das modellhaft die Klimaänderung erfahrbar macht.

Weitere Anwendungen des Treibhauseffekts in Technik und Alltag: Praktische Anwendungen des Treibhauseffekts sind z. B. Gewächshäuser und Energiesparhäuser. Ein anderes Phänomen ist z. B., dass sich bei Sonnenschein ein Auto trotz Minusgraden im Winter im Inneren sehr stark aufheizen kann oder dass es in klaren Winternächten kälter ist als in wolkenbedeckten.